DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230512.005

基于 Lyot 滤光器的 NVST 磁像仪光学系统设计

王远方舟[1,2,4,5]，王希群[1,2,3]，吕 卓[1,2,3]，金振宇[1,3*]

（1. 中国科学院云南天文台，云南 昆明 650216；2. 中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049；
3. 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室，云南 昆明 650216；4. 云南师范大学物理与电子信息学院，
云南 昆明 650500；5. 云南省光电信息技术重点实验室，云南 昆明 650500）

摘要：我国 1 m 新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope，NVST)能够实现优于 0.2″的高分辨成像观测，但还不具备高分辨磁场的常规观测能力。很多磁结构和太阳活动都存在于较小的尺度，需要进行高分辨磁场测量。1 m 新真空太阳望远镜的台址具备优良的视宁度，若磁像仪具备快速调制能力，并配合高分辨统计重建技术，有望实现亚角秒分辨率的太阳磁场测量。1 m 新真空太阳望远镜测量磁场面临的主要问题包括折轴光路带来的时变偏振、望远镜姿态变化和风载带来的光轴偏移以及湍流的影响等多种问题。针对太阳磁场高分辨观测的需求及 1 m 新真空太阳望远镜面临的太阳磁场测量问题，详细分析了 1 m 新真空太阳望远镜太阳光球磁场的测量需求，制定了磁像仪的基本参数，提出了偏振分析器需求，设计了光球磁场的高分辨观测方案。最后利用 ZEMAX 光学设计软件为磁像仪设计了光路，结果显示光学设计能够满足高分辨成像的需求。

关键词：太阳磁像仪；Lyot 滤光器；工作光路；光学设计

中图分类号：TH753⁺.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)05-0445-08

抚仙湖 1 m 新真空太阳望远镜是我国口径最大的太阳望远镜。1 m 新真空太阳望远镜配备了多通道高分辨成像系统、多波段光谱仪和大色散光谱仪等多个终端仪器，开展太阳光球和色球高分辨成像观测与高精度光谱观测。1 m 新真空太阳望远镜在太阳光球和色球高分辨观测方面取得了丰硕的研究成果，但是一直以来未能实现与高分辨成像匹配的太阳大气磁场的常规观测。为了在 1 m 新真空太阳望远镜实现与光球和色球高分辨观测匹配的光球磁场测量，我们需要研制可以实现高分辨磁场测量的磁像仪。

太阳大气磁场是驱动太阳大气活动的决定性因素，太阳大气磁场的观测研究对了解和掌握太阳活动规律及各种现象的物理本质至关重要。1984 年，文[1]设计了基于 Lyot 滤光器的第 1 台磁像仪。2022 年 10 月 9 日，我国成功发射太阳观测卫星 ASO-S(Advanced Space-based Solar Observatory)，配备了磁像仪 FMG(Full-disk MagnetoGraph)开展全日面矢量磁场的观测，并在同年 12 月成功观测到磁图[2]。但遗憾的是我国一直没有实现亚角秒分辨率的太阳磁场测量。在欧美，地基磁像仪 NIRIS，CRISP，GFPI，VTF 等和球载磁像仪 IMAX 均可以开展亚角秒分辨率的太阳磁场测量[3]。目前在我国的太阳望远镜中，1 m 新真空太阳望远镜由于抚仙湖观测基地优良的视宁度，利用配备快速调制偏振分析器和快速调制 Lyot 滤光器的磁像仪和高分辨统计重建技术，有望实现亚角秒分辨率的太阳磁场测量。

地基太阳望远镜进行太阳大气磁场测量时，测量精度受望远镜光学系统仪器偏振、地球大气和风扰、镜筒弯沉导致的光轴变化等多种因素的影响。地球大气除了湍流影响空间分辨率以外，还导致透

基金项目：国家自然科学基金（11833010）；云南省科技计划项目（202003AD150019，202105AB60001）资助.
收稿日期：2023-04-10；修订日期：2023-04-18
作者简介：王远方舟，女，博士研究生，主要研究太阳磁场测量系统. Email：ynnuwyfz@126.com.
* 通信作者：金振宇，男，研究员，主要研究天文技术与方法. Email：kim@ynao.ac.cn.

过率起伏，严重影响太阳大气磁场测量。目前解决的方法有两种，(1)用快速调制偏振分析器[4-5]进行偏振测量，(2)双光束方案[6]。如果利用 Lyot 滤光器，则不太适合采用双光束方案，我们通常采用快速调制偏振分析器。望远镜光学系统仪器偏振是另一个重要的干扰因素。1 m 新真空太阳望远镜的仪器平台安装在折轴焦点，折轴光学系统引入非常明显的时变仪器偏振。滤光器在整个视场具有稳定的透过率曲线是获得偏振光谱的又一重要前提。1 m 新真空太阳望远镜在全天的跟踪观测中，风扰和望远镜姿态变化引起光轴改变，在不同时刻的大小和速度不同，最大变化量约 46″[7-8]。不同入射角的光束经过滤光器后具有不同的透过率曲线，光轴偏移会导致进入滤光器的光束入射角发生改变，进而改变整个视场不同区域的光谱轮廓，使不同视场的图像在不同时刻的光谱信息发生改变。对于弱信号强噪声的太阳磁场测量，这也是必须克服的问题。

针对太阳磁场高分辨观测的需求及 1 m 新真空太阳望远镜面临的太阳磁场测量问题，本文设计了磁像仪。根据设计需求，本文对所设计的磁像仪光学系统进行了详细分析。

1 1m 新真空太阳望远镜太阳光球磁场测量需求分析

1.1 磁场测量设备基本参数

太阳光球磁场测量基本参数包括磁敏谱线、空间分辨率、观测视场，滤光器透过率半宽、扫描范围和有效口径，偏振分析器有效口径、采集频率等。

在可见光波段，太阳光球的磁敏谱线非常多，其中 FeI 532.4 nm，FeI 617.3 nm 和 FeI 630.2 nm 是比较常用的磁敏谱线。FeI 532.4 nm 是我国 2022 年 10 月发射的 ASO-S/FMG 的光球磁场测量谱线，FeI 617.3 nm 是美国 SDO(Solar Dynamics Observatory)/HMI(Helioseismic and Magnetic Imager)的光球磁场测量谱线，FeI 630.2 nm 是 Hinode/SOT(The Solar Optical Telescope)的光球磁场测量谱线。为了能与空间太阳观测对比，并方便开展联合观测，1 m 新真空太阳望远镜选择上述 3 条谱线为主要磁场测量谱线，根据观测需求通过更换前置滤光片并调节滤光器切换观测谱线。

1 m 新真空太阳望远镜磁像仪拟开展太阳光球的高分辨率磁场测量观测研究，为此，像素分辨率需要接近系统衍射极限分辨率。1 m 新真空太阳望远镜口径为 1 m，在 532.4 nm 波段的衍射极限分辨率为 0.11″，617.3 nm 波段的衍射极限分辨率为 0.127″。考虑到 1 m 新真空太阳望远镜最大观测视场为 180″，可用的探测器为 2 048×2 048 分辨率的 sCmos 探测器，像元分辨率确定为 0.06″，满足 617.3 nm 和 630.2 nm 波段的衍射极限成像要求，532.4 nm 波段接近衍射极限成像要求。因此，观测视场为边长 120″的方形视场。

1 m 新真空太阳望远镜磁像仪的滤光器拟采用国内技术非常成熟，且稳定性好的 Lyot 滤光器。将用于中心波长调制的旋转波片替换为 LCVR 波片，从而提高调制速度，调制速度优于 100 ms。Lyot 滤光器的核心光学器件是冰洲石，光学级冰洲石有效口径超过 40 mm 比较困难，因此有效口径定为 40 mm。滤光器波长扫描范围为±0.3 nm，滤光器透过率半宽为≤0.01 nm。偏振分析器需安装在滤光器前，有效口径也不能小于 40 mm。为了利用高分辨重建技术进行高分辨磁场测量，曝光时间不能显著大于湍流大气相干时间，经典湍流大气相干时间是 10 ms。由于磁像仪透过率低，曝光时间通常在 20～30 ms 之间，探测器的采集帧率为 30 帧/秒。LCVR 在单个波长点、单个偏振态的调制时间为 100 ms，曝光时间 20 ms，理想情况下每秒可以获得 2 个偏振态共 40 帧偏振图像。若扫描 6 个波长点，则 6 个偏振态共需要 18 s，如图 1。

1.2 1 m 新真空太阳望远镜时变仪器偏振与偏振分析器需求

1 m 新真空太阳望远镜所有仪器安装在 F_3 折轴焦点，折轴焦点处有旋转仪器平台，通过仪器平台的旋转消除像场旋转。折轴光学系统存在仪器偏振，且该仪器偏振是时变的。时变偏振特性可以通过仪器的偏振响应矩阵描述。偏振响应矩阵 $\boldsymbol{X}$ 定义为 $\boldsymbol{S}'=\boldsymbol{X}\boldsymbol{S}$，其中，$\boldsymbol{S}$ 和 $\boldsymbol{S}'$ 分别为望远镜入射光和出射光的斯托克斯(Stokes)矢量[9]。通过对望远镜偏振定标确定 $\boldsymbol{X}$。图 2 为文[10]在 2014 年对 1 m 新真空太阳望远镜定标的偏振响应矩阵，从该矩阵可以看到 I 对 Q，U 和 V 之间存在较大串扰，且随

时间变化。在磁场测量时，我们需要测量所有的斯托克斯分量，在数据处理阶段结合偏振定标模型去除串扰的影响。

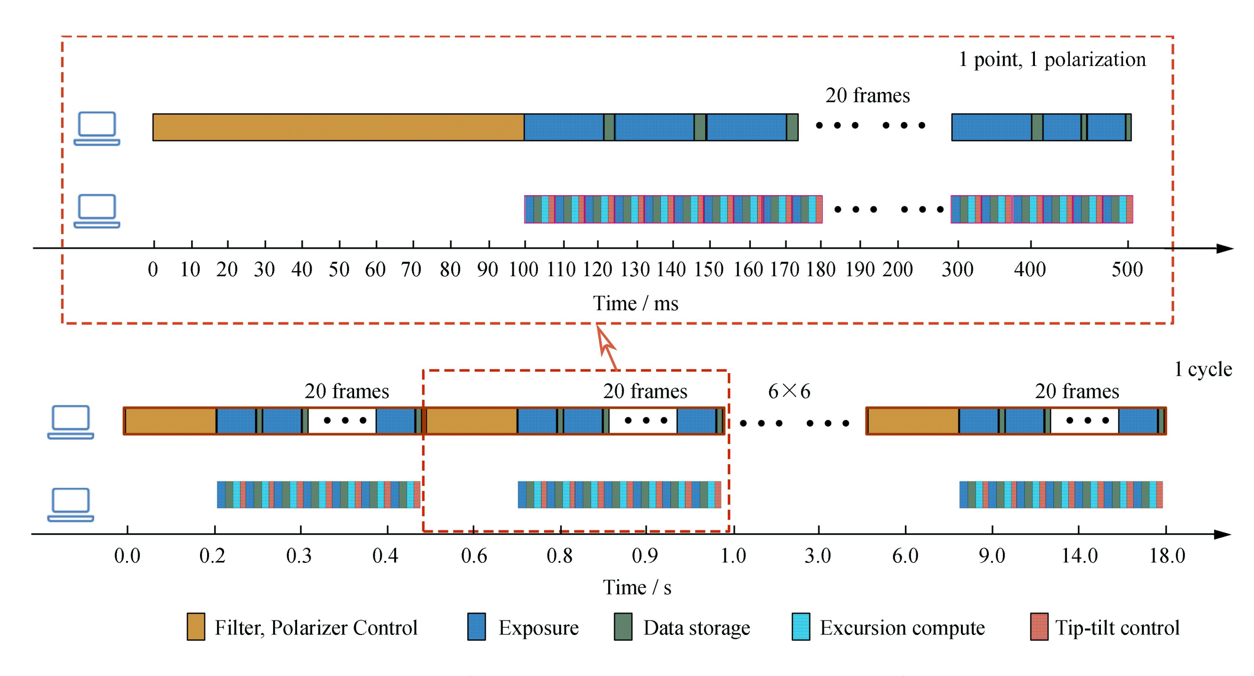


图 1　1 m 新真空太阳望远镜磁像仪观测模式的工作时序图

Fig. 1　Timing diagram of the observation mode of the imaging spectro-polarimeter for the NVST

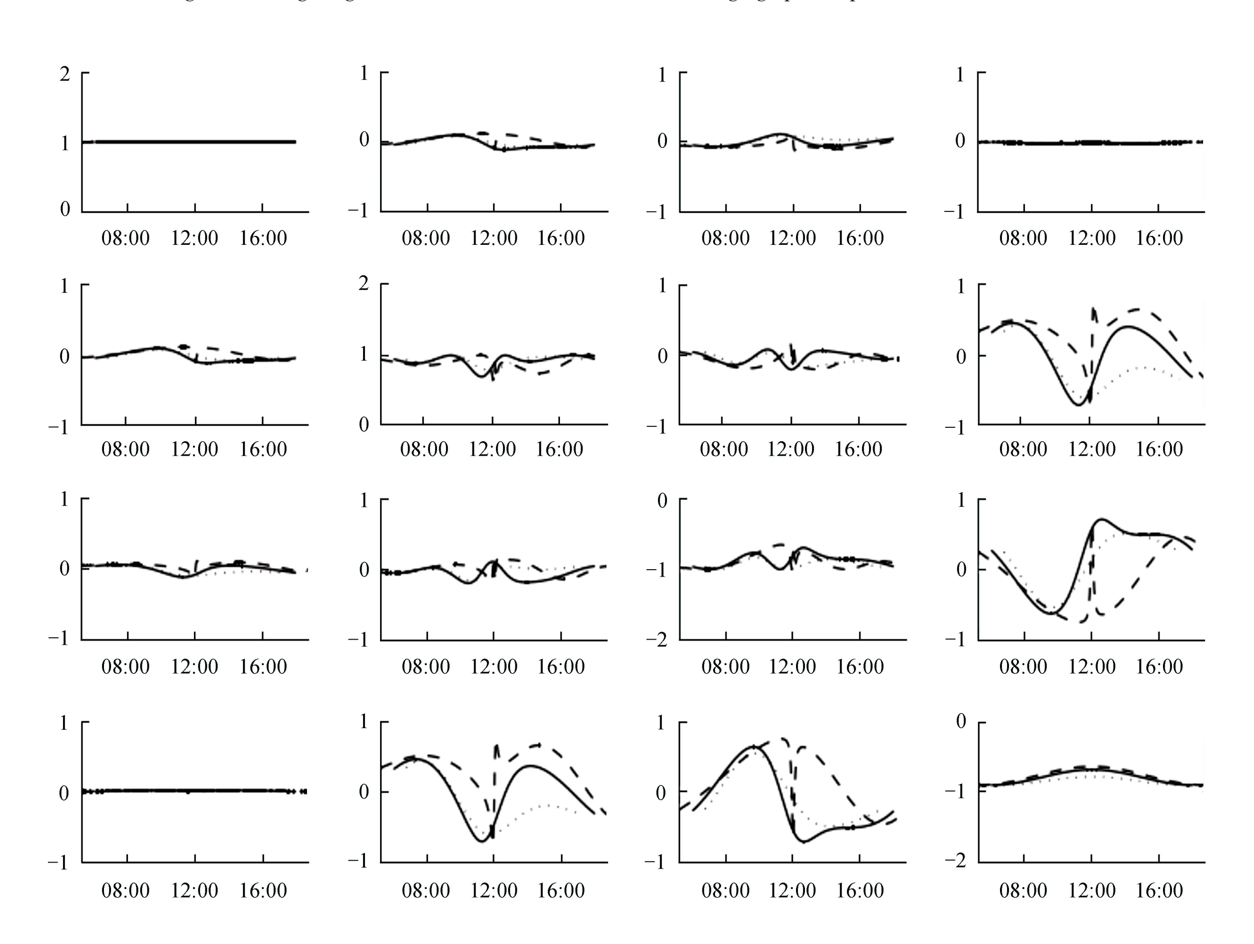


图 2　1m 新真空太阳望远镜的偏振响应矩阵随季节和时间的变化[10]

Fig. 2　Polarimeter response matrix changing with local time for different season[10]

为了解决大气透过率起伏对磁场测量的影响，偏振分析器要求所有偏振态的调制速度小于 100 ms。怀柔磁场望远镜采用 DKDP 偏振分析器，该分析器具有两个偏振态之间高速调制的能力。但是在 Q，U 和 V 观测中需要机械方式切换波片，因此不能满足 1 m 新真空太阳望远镜磁像仪的要求。ASO-S/FMG 的 LCVR 方案在所有偏振态之间的调制速度都很快，且技术方案成熟，是可以考虑的方案。

为了消除像场旋转，仪器平台和折轴光学系统之间也存在相对旋转。旋转仪器平台有一个 45°平面反射镜 M_8，将光路由垂直变为水平，仪器平台与折轴光学系统的相对旋转会引入时变的仪器偏振。望远镜仪器偏振建模没有包含这部分的时变仪器偏振定标，一种可行的方案是磁像仪光学系统中设计与 M_8 形成偏振对消的 45°平面镜。该平面镜还可以设计为快反镜，用于改正由跟踪和风扰引起的光轴偏移。

1.3　太阳光球磁场高分辨观测方案

依托抚仙湖太阳观测基地优良的大气视宁度，1 m 新真空太阳望远镜磁像仪的高分辨磁场观测，主要利用高分辨统计重建技术实现。当观测和数据处理流程稳定后，我们可以尝试用 1 m 新真空太阳望远镜已经配备的自适应光学系统进行磁场测量。因此，1 m 新真空太阳望远镜的高分辨磁场测量将用白光通道进行高分辨重建，利用白光通道高分辨重建结果对磁场测量通道数据进行重建。这要求白光通道和磁场测量通道进行同步观测。

高分辨重建技术将多帧短曝光图像进行统计重建，因此单帧图像需要有足够的信噪比。要观测光球磁场，窄带滤光器的半宽至少达到 0.01 nm。1 m 新真空太阳望远镜磁像仪使用双折射 Lyot 滤光器，透过率接近 10%，这使得偏振光谱测量通道探测器接收的光强信号较弱，降低高分辨重建的准确性。因此在偏振分析器前使用分光棱镜将 5%的光导出，再配合半宽为 1 nm 的滤光片，与偏振光谱测量通道同步成像。宽带图像由于具有高信噪比，可以直接进行斑点重建。通过重建的宽带图像得到大气的瞬时光学传递函数(Optical Transfer Function，OTF)，并对同时记录的窄带图像进行退卷积。宽带通道不仅可以做同步重建，还可以测量和改正大气透过率起伏和湍流大气的非等晕效应。

为了方便两个通道图像配准，同步通道和偏振光谱测量通道需要尽可能拥有一致的图像，这对光路的光学性能参数提出要求。首先，需保证两个通道拥有同样的视场和分辨率，这要求两个通道使用同样的探测器。其次，需将两个通道的成像光路设计为远心光路。两个通道在观测的过程中，需要在 F_3 处放置视场定标单元进行视场定标。定标时依靠调节探测器的位置来调节像的清晰度，远心光路可以避免调焦不准导致的图像比例尺改变。另外，相位差法是计算大气点扩散函数(Point Spread Function，PSF)的一种有效方式，是望远镜采用的高分辨重建方法之一。相位差法依靠在同步通道拍摄的离焦像和焦点像计算大气的点扩散函数，远心光路可以使焦点像和离焦像具有相同的比例尺，避免缩放引入的误差。

2　1 m 新真空太阳望远镜磁像仪的光路设计方案

光路设计需要首先进行外形设计，确定光束口径，并分配各光组的聚光能力。由于滤光器和偏振分析器已经研制完毕，两个部件的口径已经确定，需避免光束因为口径不够产生渐晕效应。光路的高斯设计可以初步确定光路中各元件的口径、各光组的焦距，以及光路的结构。

1 m 新真空太阳望远镜由主焦点处的视场光阑限定视场大小，使 F_3 处的像高为 39.3 mm。经过准直镜 L_1 成像后，得到出瞳直径为 10 mm，出瞳处放置摆镜，再通过远心物镜 L_2 成像。准直镜 L_1 的焦距为 420 mm，成像镜 L_2 的焦距为 208.56 mm。同步通道的 F 数为 22.8。F_4 后的光束再次被准直镜 L_3 扩大，形成瞳面 P_2，直径为 26 mm。Lyot 滤光器的最厚级放在 P_2 处。光束通过滤光器后再经成像镜 L_4 成像，L_3 和 L_4 的焦距为 550 mm，F_4 和 F_5 处理想像高 19.5 mm。

高斯设计得到光学系统基本结构之后，使用 ZEMAX 光学设计软件校正光路的像差。利用 ZEMAX 设计光路时，一次性搭建好整个系统会降低优化速度，故采用分步设计的方式。第 1 步，设

计 F_3 到 F_4 的光路。根据高斯设计得到的光焦度分配，直接选择 ZEMAX 专利库的双胶合结构缩放成高斯设计中 L_1 和 L_2 的焦距，构建双远心初始结构。通过在评价函数中控制 L_1，L_2 和整个系统的总焦距，采用阻尼最小二乘法，结合使用普通优化和锤形优化两种方式可以得到符合像差要求的结构。第 2 步，搭建多重结构，同时优化 F_4 和 F_5 的像差。从高斯设计的光路中可以看出，F_3 到 F_4 和 F_4 到 F_5 结构相同，因此，通过缩放优化好的 F_3 和 F_4 光路，并将光路输入现有系统后，可以得到整个光路的初始结构。由于 F_4 和 F_5 处都需要放置探测器，因此，两个焦面的像质都需要达到设计要求。此时搭建多重结构，可以查看两个像面处的像质。在评价函数中分别对两个结构的参数进行设置并优化。多重结构会增加系统的复杂性，降低优化速度，锤形优化过程中更难跳出极小值，而同时满足两个像面的像质也很困难，此时需要在评价函数中适当降低中心视场的权重，平衡像差，使两个通道都达到设计要求。

设计结果显示，磁像仪光路在两个通道都达到了衍射极限。如图 3，(a)和(b)分别为偏振光谱测量通道和同步通道的振幅传递函数(Modulation Transfer Function，MTF)，可以看出振幅传递函数接

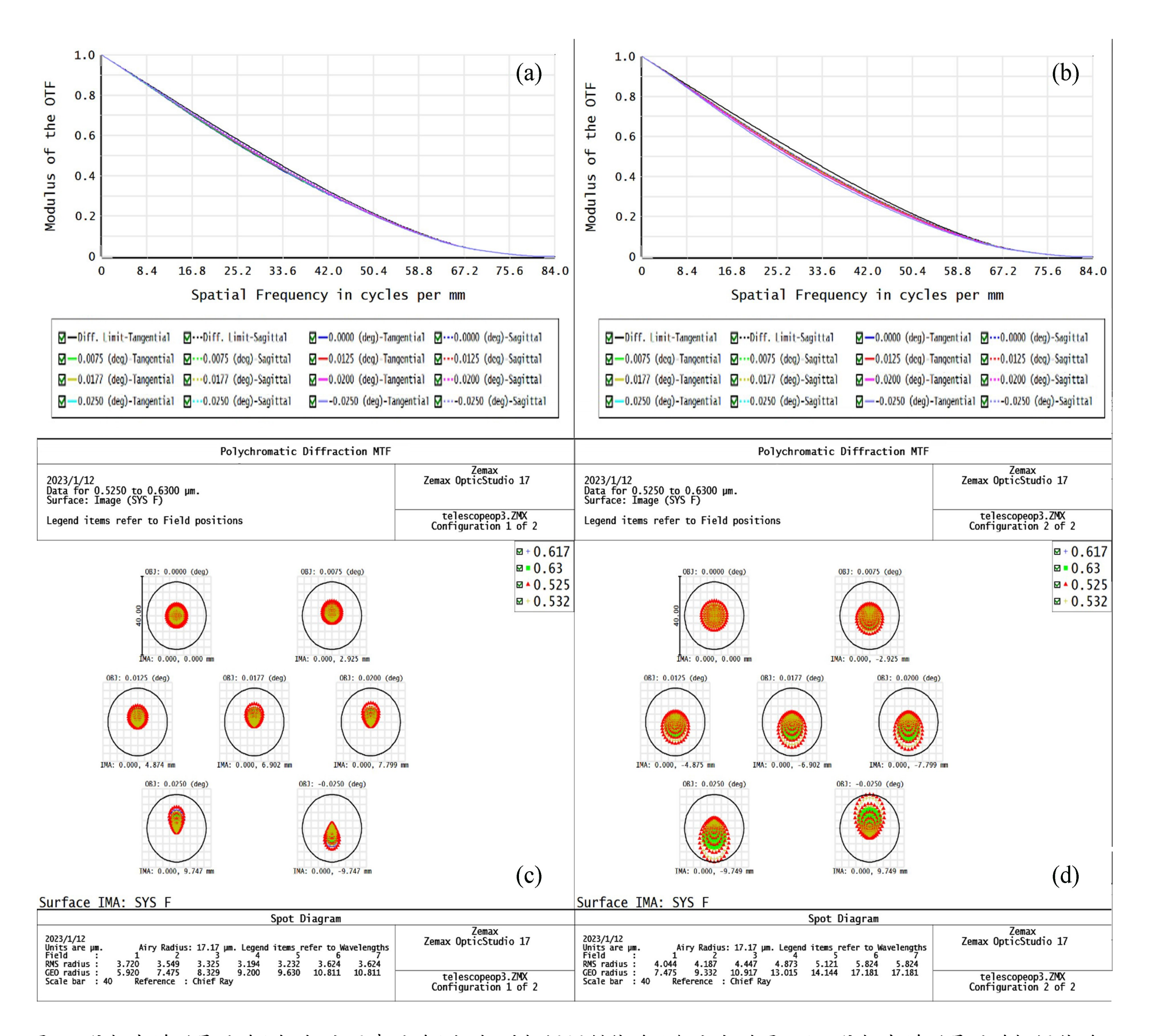


图 3　偏振光谱测量通道(左列)和同步通道(右列)的振幅调制传递函数和点列图。(a)偏振光谱测量通道振幅传递函数；(b)同步通道振幅传递函数；(c)偏振光谱测量通道点列图；(d)同步通道点列图

Fig. 3　MTF and spot diagram of polarization spectrum measurement channel (left column) and synchronization channel (right column). (a) MTF of polarization spectrum measurement channel; (b) MTF of synchronization channel; (c) spot diagram of polarization spectrum measurement channel; (d) spot diagram of synchronization channel

近衍射极限，并且具有较好的一致性。(c)和(d)分别为偏振光谱测量通道和同步通道各个视场的弥散斑，两个通道艾里斑直径都为17.17 μm，弥散斑大小都未超过艾里斑。图4为中心视场和边缘视场两个通道的波前像差，(a)和(b)分别为两个通道边缘视场的波前像差，(c)和(d)分别为两个通道中心视场的波前像差。其中，偏振光谱测量通道边缘视场波前像差的峰谷(Peak to Valley, PV)值为0.163 λ，均方根(Root Mean Square, RMS)值为0.011 9 λ；同步通道波前像差峰谷值为0.151 6 λ，均方根值为0.024 4 λ，中心视场优于边缘视场。波前像差的均方根值小于1/14波长，满足衍射极限成像的要求。

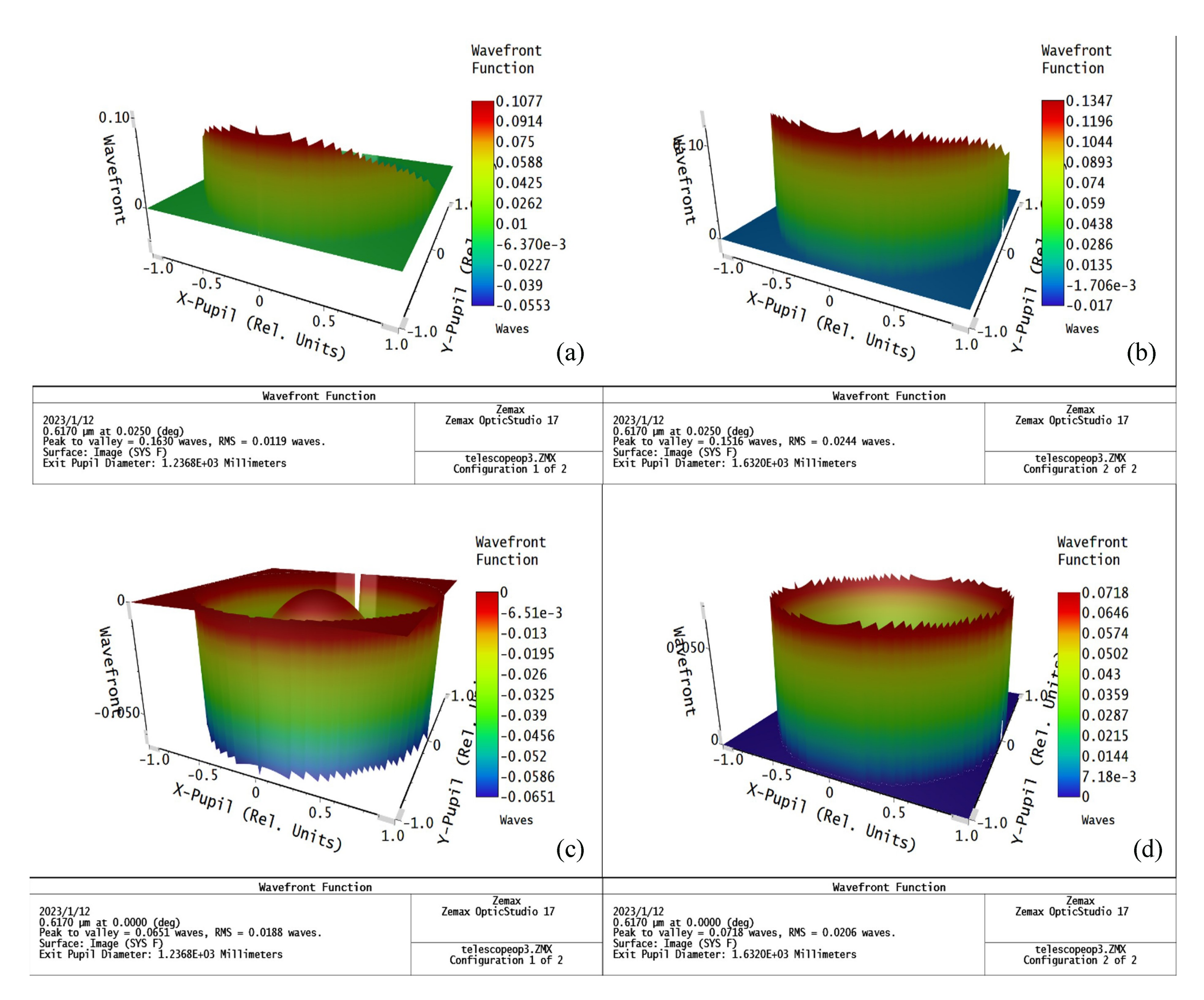


图4 偏振光谱测量通道(左列)和同步通道(右列)的波前像差。(a)偏振光谱测量通道边缘视场波前像差；(b)同步通道边缘视场波前像差；(c)偏振光谱测量通道中心视场波前像差；(d)同步通道中心视场波前像差

Fig. 4 Wavefront aberration of polarization spectrum measurement channel (left column) and synchronization channel (right column). (a) Wavefront aberration of marginal field of view of polarization spectrum measurement channel; (b) wavefront aberration of marginal field of view of synchronization channel; (c) wavefront aberration of central field of view of polarization spectrum measurement channel; (d) wavefront aberration of central field of view of synchronization channel

同步通道和偏振光谱测量通道的畸变是影响同步重建的重要因素，如图5，两个通道的畸变都控制在了极小的范围内。由于偏振光谱测量通道在同步通道后端，同步通道参与了偏振光谱测量通道的成像，分担了像差贡献。这使得偏振光谱测量通道和同步通道只能分别为正负畸变才能将偏振光谱测量通道的畸变控制在0.05%以内。正负畸变会增加两个通道在边缘视场的成像差异，因此，需要进一步缩小畸变值。最终，我们将同步通道的相对畸变控制在最大值为0.005 3%，偏振光谱测量通道的最大值为-0.021%。此时，两个通道的1/2像高为同步通道9.767 mm，偏振光谱测量通道9.758 mm。

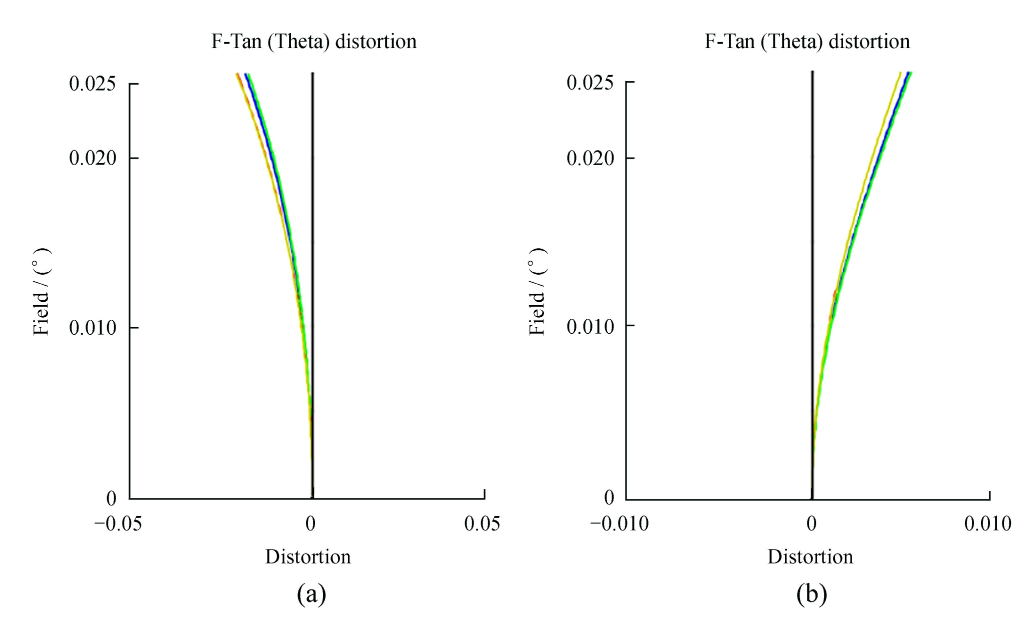


图 5　(a) 偏振光谱测量通道相对畸变；(b) 同步通道相对畸变

Fig. 5　(a) Relative distortion of polarization spectrum measurement channel; (b) relative distortion of synchronization channel

3　结束语

磁像仪是地基太阳望远镜实现高分辨磁场测量的重要设备。1 m 新真空太阳望远镜为实现高分辨磁场测量已经做了大量的研究工作。2022 年，我们为磁像仪设计的液晶 Lyot 滤光器得以成功研制并进行试观测，这使磁像仪具备快速调制能力，能够在大气相干时间内测得望远镜的偏振信息，1 m 新真空太阳望远镜向实现高分辨磁场观测这一目标迈进一大步。本文基于前期大量实验发现的问题，结合图像处理需求制定了磁像仪同步重建系统的光学设计目标。磁像仪设计考虑了地基磁像仪的设计要素，设计过程中结合了 1 m 新真空太阳望远镜的结构特征和数据处理需求，光学设计实现了衍射极限成像和畸变需求。

参考文献：

[1]　AI G X, HU Y F. Principles of a solar magnetic field telescope [J]. Acta Astronomica Sinica, 1986, 27(2): 173-180.

[2]　DENG Y Y, ZHANG H Y, YANG J F, et al. Design of the Full-disk MagnetoGraph (FMG) onboard the ASO-S [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 157-169.

[3]　王远方舟, 金振宇, 王希群, 等. 窄带可调谐滤光器在太阳磁场测量中的应用 [J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1927-1940.
WANG Y F Z, JIN Z Y, WANG X Q, et al. Application of the tunable narrowband filter in measurements of solar magnetic fields [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1927-1940.

[4]　胡平, 顾乃庭, 饶长辉. 基于双 DKDP 晶体原理的太阳大气实时偏振探测技术研究 [J]. 天文研究与技术, 2021, 18(4): 544-553.
HU P, GU N T, RAO C H. Real time polarization detection of solar atmosphere based on double DKDP crystals principle [J]. Astronomical Research & Technology, 2021, 18(4): 544-553.

[5]　侯俊峰, 邓元勇, 王东光, 等. 液晶调制技术在太阳磁场探测中的应用及展望 [J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 296-304.

HOU J F, DENG Y Y, WANG D G, et al. Application and prospect of liquid crystal modulation technology in solar magnetic field detection [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(3): 296-304.

[6] MARTÍNEZ PILLET V, DEL TORO INIESTA J C, ÁLVAREZ HERRERO A, et al. The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the sunrise balloon-borne solar observatory [J]. Solar Physics, 2011, 268(1): 57-102.

[7] 柳光乾，校启公，邓林华，等. 1 m 太阳望远镜光轴变化检测与改正 [J]. 中国激光，2013，40(1)：206-211.

LIU G Q, XIAO Q G, DENG L H, et al. Detection and calibration of optical axes change for one meter solar telescope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 206-211.

[8] 刘荣辉，刘辉，穆恒宇，等. 地平式太阳望远镜库德焦面指向跟踪误差建模研究 [J]. 天文研究与技术，2022，19(6)：588-595.

LIU R H, LIU H, MU H Y, et al. Study on pointing and tracking model of Coude focal plane of altazimuth solar telescope [J]. Astronomical Research & Technology, 2022, 19(6): 588-595.

[9] ICHIMOTO K, LITES B, ELMORE D, et al. Polarization calibration of the solar optical telescope onboard hinode [J]. Solar Physics, 2008, 249(2): 233-261.

[10] YUAN S. Polarization model for the New Vacuum Solar Telescope [C]// Proceedings of the Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2014.

Design of Optical System of the Lyot Filter Based on Magnetograph of the NVST

Wang Yuanfangzhou[1,2,4,5], Wang Xiqun[1,2,3], Lv Zhuo[1,2,3], Jin Zhenyu[1,3*]

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China, Email: kim@ynao.ac.cn;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Yunnan Key Laboratory of Solar Physics and Space Science, Kunming 650216, China;
4. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
5. Yunnan Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The 1 m New Vacuum Solar Telescope (NVST) is capable of high-resolution imaging observations better than 0.2″, but cannot yet routinely observe high-resolution magnetic fields. Many magnetic structures and solar activity exist at small scales, requiring high-resolution magnetic field observations. NVST offers excellent seeing, and if the magnetometer has fast modulation capabilities and is coupled with statistical reconstruction techniques, it is expected to achieve high-resolution solar magnetic field measurements. The main problems faced by NVST in measuring magnetic fields include time-varying polarisation due to bending-axis optical paths, optical axis shifts due to telescope attitude changes and wind loading, and the effects of turbulence. In this paper, we analyze in detail the requirements for high-resolution observation of the solar magnetic field and the solar magnetic field measurement problems faced by NVST, formulate the basic parameters of the magnetometer, propose the requirements for the polarisation analyzer, and design a high-resolution observation scheme for the photospheric magnetic field. Finally, the optical path for the magnetometer is designed using ZEMAX optical design software, and the results show that the optical design can meet the requirements of high-resolution imaging.

Key words: solar magnetograph; Lyot filter; mounting in optical path; optical design